

## Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ

© А. Ю. Андришкин<sup>1✉</sup>, Е. О. Афанасьев<sup>2</sup>, Е. Н. Кадочникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет “ВОЕНМЕХ” им. Д. Ф. Устинова (Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** При тушении горящих твердых веществ использование воды из-за ее большого расхода и низкой изолирующей способности водяных пленок малоэффективно. В результате применения вязких гидрогелей в качестве огнетушащей жидкости снижается ее расход и образуется на горячей поверхности гидрогелевая пленка, имеющая по сравнению с водяной большую толщину и лучшую изолирующую способность.

**Цели и задачи.** Целью проведенного исследования являлось сравнение эффективности применения воды и вязких гидрогелей в качестве огнетушащих жидкостей при тушении твердых веществ. Решались следующие задачи: оценка влияния концентрации гелеобразующих добавок на вязкость и испарение гидрогелей; определение влияния вязкости огнетушащей жидкости на толщину пленки и расход жидкости, стекающей с вертикальной стенки; количественное сравнение эффективности пожаротушения воды и различных гидрогелей по их расходу и по толщине пленки.

**Методы.** Проведен анализ влияния концентрации гелеобразующих добавок на вязкость и испарение гидрогелей. Получено выражение для определения вязкости гидрогеля “Фаерсорб” в зависимости от концентрации полимерной добавки. Получены зависимости массы испарившегося гидрогеля “Фаерсорб” от времени при различной концентрации полимерной добавки. Дана оценка эффективности использования гидрогелей по их расходу и по толщине гидрогелевых пленок. Получена зависимость толщины пленки огнетушащей жидкости, стекающей с вертикальной стенки, от ее вязкости и плотности. Предложен коэффициент эффективности использования гидрогеля, который характеризует экономичность гидрогеля по его расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине. Проведен расчет эффективности использования гидрогелей различной вязкости по сравнению с водой.

**Результаты и их обсуждение.** Изменяя концентрацию гелеобразующей добавки, можно варьировать вязкость и испаряемость гидрогеля. Чем больше вязкость гидрогеля, стекающего с вертикальной стенки, тем толще гидрогелевая пленка и меньше его расход. По сравнению с водой эффективность использования гидрогелей в 2...4 раза выше.

**Выводы.** Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о том, что применение вязких гидрогелей эффективно при тушении горящих твердых веществ.

**Ключевые слова:** огнетушащая жидкость; полимерные добавки; концентрация; вязкость жидкости; испарение жидкости; расход жидкости; гидрогелевая пленка.

**Для цитирования:** Андришкин А. Ю., Афанасьев Е. О., Кадочникова Е. Н. Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 53–62. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.53-62.

✉ Александр Юрьевич Андришкин, e-mail: sascha1a@mail.ru

## Effectiveness of viscous hydrogel in extinguishing burning solid substances

© Alexander Yu. Andryushkin<sup>1✉</sup>, Eugene O. Afanasiev<sup>2</sup>, Elena N. Kadochnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Baltic State Technical University “VOENMEH” (1-ya Krasnoarmeyskaya St., 1, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

<sup>2</sup> Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** When extinguishing burning solids, the use of water due to its high consumption and low insulating capacity of water films is ineffective. As a result of using viscous hydrogels as a fire extinguishing liquid, its consumption is reduced and a hydrogel film is formed on the burning surface, which has a greater thickness and better insulating ability compared to water.

**Aims and purposes.** The aim of this study was to compare the effectiveness of using water and viscous hydrogels as a fire extinguishing liquid in the extinguishing of solid substances. The following tasks were solved: assessment of the impact of the concentration of gelling additives on the viscosity and evaporation of hydrogels; determination of the effect of viscosity of the fire extinguishing liquid film thickness and flow rate of liquid flowing from a vertical wall; a quantitative comparison of the effectiveness of fire suppression water, and various hydrogels according to their flow rate and film thickness.

**Methods.** The influence of the concentration of gel-forming additives on the viscosity and evaporation of hydrogels was analyzed. An expression is obtained for the viscosity of the “Firesorb” hydrogel depending on the concentration of the polymer additive. The dependences of the evaporated mass of the hydrogel “Firesorb” from time to time at different concentrations of polymer additives. Evaluate the effectiveness of the use of hydrogels in their consumption and the thickness of the hydrogel films. The dependence of the film thickness of the extinguishing liquid flowing from the vertical wall on its viscosity and density is obtained. The coefficient of efficiency of hydrogel use is proposed, which characterizes the efficiency of hydrogel by its consumption and the insulating ability of the hydrogel film by its thickness. The efficiency of using hydrogels of different viscosities in comparison with water is calculated.

**Results and discussion.** By changing the concentration of the gel-forming additive, you can vary the viscosity and evaporation of the hydrogel. The higher the viscosity of the hydrogel flowing from the vertical wall, the thicker the hydrogel film and less its consumption. Compared with water, the efficiency of using hydrogels is 2...4 times higher.

**Conclusions.** The results obtained during the study indicate that the use of viscous hydrogels is effective in extinguishing burning solids.

**Keywords:** fire extinguishing liquid; polymer additives; concentration; liquid viscosity; liquid evaporation; liquid consumption; hydrogel film.

**For citation:** A. Yu. Andryushkin, E. O. Afanasiev, E. N. Kadochnikova. Effectiveness of viscous hydrogel in extinguishing burning solid substances. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 53–62 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.53-62.

✉ Alexander Yuryevich Andryushkin, e-mail: sascha1a@mail.ru

## Введение

Для ликвидации пожаров класса А, т. е. для тушения горящих твердых веществ, чаще всего используют воду, что обусловлено ее свойствами (плотность  $1000 \text{ кг/м}^3$ ; динамическая вязкость  $0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; удельная теплоемкость  $4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; поверхностное натяжение  $0,072 \text{ Н/м}$ ). Основным огнетушащим свойством воды является способность охлаждать горящие материалы за счет своей высокой удельной теплоемкости. В то же время применение воды для ликвидации возгораний твердых материалов имеет ряд существенных недостатков. Из-за низкой вязкости вода на горящих поверхностях образует тонкие пленки, которые очень слабо изолируют поверхность от воздействия пламени и от доступа кислорода из окружающей среды. Вследствие высокого поверхностного натяжения и низкой вязкости воды пленки быстро стекают с наклонных поверхностей, за короткое время разрушаются и испаряются. Обычно толщина водяной пленки составляет  $\delta < 0,2 \text{ мм}$  [1, 2].

Этими недостатками обуславливается существенно низкая эффективность тушения пожаров водой. Непосредственно на тушение самого очага возгорания используется до 10 % расходуемой воды, остальные 90 % тратятся бесполезно, поэтому для ощутимого воздействия на пожар вынужденно увеличивают ее расход, что приводит к потере большого объема воды. В некоторых случаях ущерб от пролитой воды превышает ущерб от самого пожара, поэтому проблема повышения эффективности ее использования при тушении пожаров весьма актуальна [3–8].

Основным направлением повышения эффективности использования воды на пожарах является применение вязких огнетушащих жидкостей. Вязкая огнетушащая жидкость чаще всего представляет собой гидрогель — структурированную дисперсную систему, состоящую из высокомолекулярного компонента, образующего дисперсную фазу, и низкомолекулярного компонента, образующего дисперсионную среду. В гидрогеле частицы дисперсной фазы взаимодействуют друг с другом и формируют пространственную макромолекулярную структурную сетку (каркас), из-за наличия которой дисперсионная среда (вода) лишается подвижности и сосредотачивается в ячейках структурной сетки (рис. 1). Именно этим обуславливается повышение вязкости гидрогеля.

Для получения гидрогелей используют различные по своему составу неорганические и органические

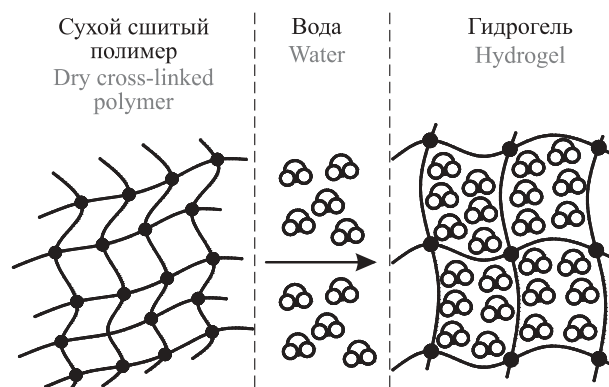


Рис. 1. Образование гидрогеля

Fig. 1. The formation of hydrogel

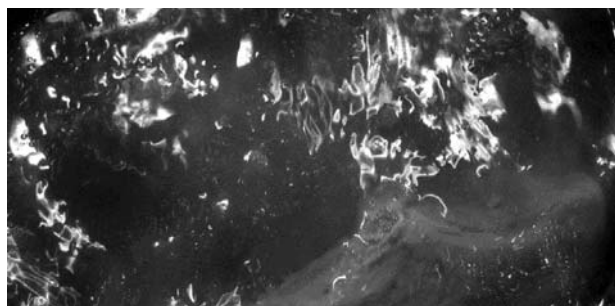


Рис. 2. Поверхность стекающей гидрогелевой пленки

Fig. 2. Surface of the flowing hydrogel film

ские добавки, которые при взаимодействии с водой набухают (степень набухания может достигать до 600 %) и формируют структурную сетку гидрогеля. Гидрогели способны поглощать и удерживать значительное количество воды — до 2 кг на 1 г сухой добавки. Обладая высокой вязкостью, они образуют толстую пленку, покрывающую горящие поверхности и тем самым изолирующую их от источника нагрева и от доступа кислорода (рис. 2) [9–14].

Эффективность огнетушащей жидкости чаще всего оценивают по количественным показателям — расходу, интенсивности подачи или времени, необходимому для тушения модельного очага пожара. Чем меньше количественные показатели для конкретной огнетушащей жидкости, тем выше ее эффективность пожаротушения.

Целью проведенного исследования являлось сравнение эффективности применения воды и вязких гидрогелей в качестве огнетушащих жидкостей при тушении твердых веществ.

Для достижения цели исследования были сформулированы следующие задачи:

- 1) оценка влияния концентрации гелеобразующих добавок на вязкость и испарение гидрогелей;
- 2) определение влияния вязкости огнетушащей жидкости на толщину пленки и расход этой жидкости, стекающей с вертикальной стенки;
- 3) количественное сравнение эффективности пожаротушения воды и различных гидрогелей по их расходу и по толщине пленки.

### Свойства используемых при пожаротушении гидрогелей

**Вязкость гидрогелей.** В целях уменьшения расхода воды при пожаротушении с помощью гидрогелей были опробованы различные гелеобразующие добавки. Рассмотрим хорошо показавшие себя гелеобразующие добавки и влияние их концентрации на вязкость гидрогелей [15–18].

Для повышения вязкости воды используют неорганические добавки, в частности бентонит — природный глинистый минерал, гидроалюмосиликат, обладающий свойством набухать при гидратации в

Таблица 1. Зависимость вязкости и плотности гидрогеля от концентрации бентонита [19]

Table 1. Dependence of hydrogel viscosity and density on bentonite concentration [19]

Концентрация бентонита $c_d$ , % Concentration of bentonite $c_{add}$ , %	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Динамическая вязкость $\eta$ , Па·с Dynamic viscosity $\eta$ , Pa·s	Кинематическая вязкость $\nu$ , м <sup>2</sup> /с Kinematic viscosity $\nu$ , m <sup>2</sup> /s
5	1010	0,0103	$10,197 \cdot 10^{-6}$
8	1025	0,0186	$18,135 \cdot 10^{-6}$
10	1042	0,0273	$26,207 \cdot 10^{-6}$
15	1075	0,4427	$411,73 \cdot 10^{-6}$

$\eta$ , Па·с /  $\eta$ , Pa·sec

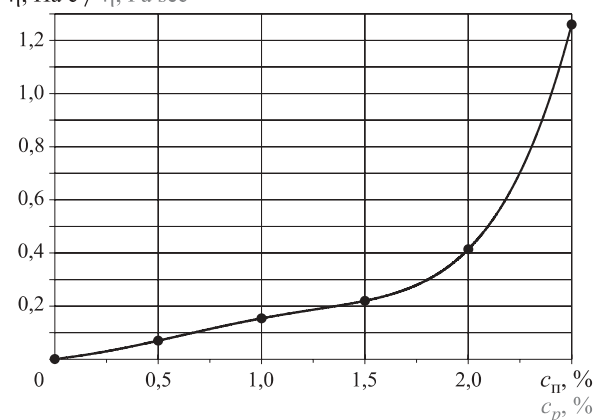


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости гидрогеля  $\eta$  от концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p$  [20]

Fig. 3. Dependence of the dynamic viscosity of the hydrogel  $\eta$  the concentration of polymer additives “Firesorb”  $c_p$  [20]

14–16 раз. В результате гидратации, т. е. при присоединении молекулами бентонита молекул воды, формируется вязкий гидрогель. Вязкость гидрогеля сильно зависит от концентрации бентонита  $c_d$ , который образует структурную сетку, удерживающую молекулы воды (табл. 1) [19].

Перспективно для формирования гидрогелей применять полимерные добавки, например полиакриламиды. Полимерная добавка мгновенно набухает, достигая своей полной сорбционной способности. Процесс формирования гидрогеля длится в течение нескольких секунд. Рекомендуемая концентрация широко применяемой полимерной добавки “Фаерсорб” составляет  $c_p = 1,0 \dots 2,5$  %. Полимерная добавка “Фаерсорб” представляет собой дисперсный раствор полиакрилата натрия со стабилизирующими добавками. Гидрогель при концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p = 1$  % имеет следующие показатели (при 20 °C):  $\nu = 140 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>; поверхностное натяжение 33,4 мН/м (рис. 3) [20].

Зависимость динамической вязкости гидрогеля  $\eta$  от концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p$  (см. рис. 1) описывается полиномиальным уравнением регрессии:

$$\eta = 0,0017c_p^5 - 0,0174c_p^4 + 0,0609c_p^3 - 0,0716c_p^2 + 0,0675c_p - 0,04. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что вязкость гидрогеля при концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p < 1,0\%$  остается низкой, поэтому гидрогель может проникать в поры и пустоты горящей поверхности. При повышении концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” до  $2,0\%$  вязкость гидрогеля увеличивается, снижается его текучесть и толщина гидрогелевой пленки на горящей поверхности растет. При концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p > 2,0\%$  гидрогель становится весьма вязким, толщина гидрогелевой пленки — значительной, и она может использоваться для долговременной защиты конструктивных элементов от воздействия высоких температур.

**Испаряемость гидрогелей.** Вязкий гидрогель создает толстую защитную пленку на поверхности горящих твердых материалов. Гидрогелевая пленка состоит на  $95\text{--}99\%$  из воды и поэтому имеет высокую охлаждающую способность. Чем больше концентрация полимерной добавки “Фаерсорб” в гидрогеле, тем в меньшей степени он испаряется при высоких температурах (рис. 4) [20, 21]. Зависимость массы испарившейся жидкости  $m_{и.ж}$  (г) от времени при температуре  $150^\circ\text{C}$  описывается полиномиальным уравнением регрессии:

- для воды:

$$m_{и.ж} = 1 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 0,0059\tau^2 + 1,3094\tau - 4,038; \quad (2)$$

- для гидрогеля с содержанием полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p = 1\%$ :

$$m_{и.ж} = 8 \cdot 10^{-6} \tau^3 - 0,0041\tau^2 + 1,0649\tau - 3,4436; \quad (3)$$

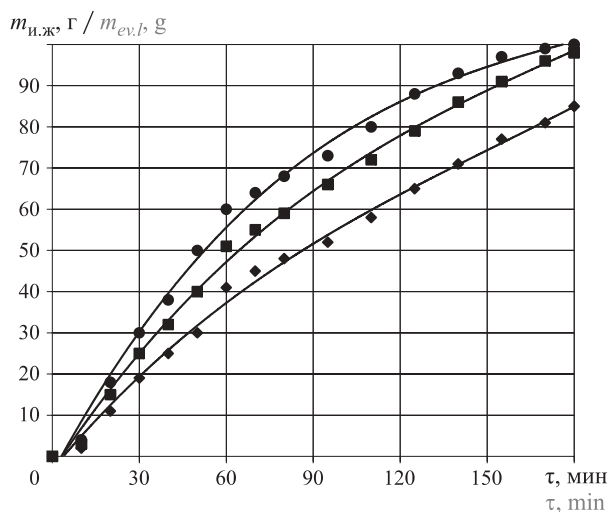
- для гидрогеля с содержанием полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p = 3\%$ :

$$m_{и.ж} = 7 \cdot 10^{-6} \tau^3 - 0,0032\tau^2 + 0,841\tau - 3,1625, \quad (4)$$

где  $\tau$  — время, мин.

Анализ выражений (2)–(4) показывает, что с увеличением концентрации полимерной добавки испарение жидкости с поверхности гидрогеля уменьшается. Чем выше содержание полимерной добавки в гидрогеле, тем больше времени требуется на его испарение.

Испарение гидрогеля происходит с поверхности, обращенной к огню. Толщина гидрогелевой пленки может достигать нескольких миллиметров, что значительно больше по сравнению с водяной пленкой, поэтому изолирующая способность гидрогелевой



**Рис. 4.** Зависимость массы испарившейся жидкости  $m_{и.ж}$  от времени  $\tau$  при температуре  $150^\circ\text{C}$  при одинаковом объеме жидкости и площади поверхности испарения: ● — вода; ■ — гидрогель с концентрацией полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_p = 1\%$ ; ◆ — то же,  $c_p = 3\%$

**Fig. 4.** Dependence of the mass of evaporated liquid  $m_{ev,l}$  from time  $\tau$  at a temperature of  $150^\circ\text{C}$ , for the same liquid volume and surface area evaporation: ● — water; ■ — hydrogel with the concentration of polymer additives “Firesorb”  $c_p = 1\%$ ; ◆ — the same,  $c_p = 3\%$

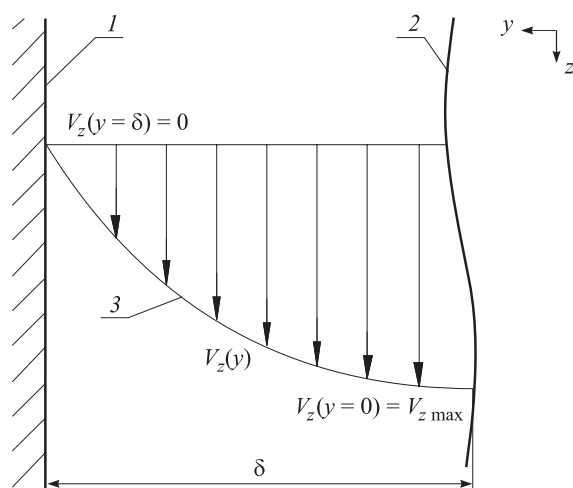
пленки на поверхности горящих твердых материалов будет в несколько раз выше. Поверхностные слои гидрогелевой пленки, близко расположенные к огню, нагреваются до  $100^\circ\text{C}$ , а нижележащие слои имеют температуру ниже  $100^\circ\text{C}$ . В связи с этим в гидрогелевой пленке по ее толщине возникает существенный температурный градиент, что свидетельствует о высокой защитной способности гидрогеля. Повышение температуры защищаемой поверхности происходит только тогда, когда большая часть гидрогелевой пленки испарится, ее толщина уменьшится и температурный градиент станет незначительным.

Таким образом, концентрация гелеобразующей добавки существенно влияет на его вязкость, от которой в свою очередь зависит толщина гидрогелевой пленки на горящей поверхности. Чем выше вязкость гидрогеля, тем дольше он испаряется при воздействии высокой температуры и тем выше изолирующая способность гидрогелевой пленки.

### Оценка эффективности использования гидрогелей по их расходу и по толщине гидрогелевых пленок

В зависимости от условий применения расход воды при тушении пожаров класса А по сравнению с гидрогелем больше в  $1,5\text{--}10,0$  раз. Толщина гидрогелевой пленки, формирующейся на горящих поверхностях, в несколько раз больше толщины водяной пленки. Учитывая такой большой разброс по рас-





**Рис. 5.** Распределение скоростей по толщине гидрогелевой пленки: 1 — вертикальная стенка; 2 — свободная поверхность стекающей гидрогелевой пленки; 3 — профиль скоростей по толщине гидрогелевой пленки;  $\delta$  — толщина гидрогелевой пленки;  $V_z$  — скорость гидрогелевой пленки вдоль оси  $z$ ;  $y$  — ось, направленная в сторону уменьшения скорости, перпендикулярно стенке;  $z$  — ось, направленная в сторону стекания гидрогелевой пленки

Fig. 5. Distribution of velocities along the thickness of the hydrogel film: 1 — vertical wall; 2 — free surface of the flowing hydrogel film; 3 — velocity profile along the thickness of the hydrogel film;  $\delta$  — thickness of the hydrogel film;  $V_z$  — speed of the hydrogel film along the  $z$  axis;  $y$  — axis directed towards the decrease in speed, perpendicular to the wall;  $z$  — axis directed

ходу воды и гидрогеля, а также по толщине водяной и гидрогелевой пленок, количественно оценим влияние концентрации различных гелеобразующих добавок на эффективность использования гидрогелей по сравнению с водой [22].

Оценим расход гидрогеля при его ламинарном стекании с вертикальной стенки в виде пленки шириной  $b$  (рис. 5). При ламинарном режиме течения частицы жидкости перемещаются только вдоль оси  $z$ .

В результате совместного решения уравнения Навье – Стокса для одномерного установившегося потока (вдоль оси  $z$ ) с уравнением неразрывности потока получим выражения для определения скорости течения гидрогелевой пленки [23, 24]:

$$V_z(y) = \frac{\rho g \delta^2}{2\eta} \left( 1 - \frac{y^2}{\delta^2} \right), \quad (5)$$

где  $V_z(y)$  — скорость гидрогелевой пленки на расстоянии  $y$  от ее свободной поверхности, м/с;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  
 $y$  — координата оси, направленная в сторону уменьшения скорости, перпендикулярно стенке, м.

Из выражения (5) видно, что скорость по сечению свободной гидрогелевой пленки изменяется по параболе, максимальная скорость течения достигается у свободной поверхности пленки.

Среднюю скорость гидрогелевой пленки можно найти из выражения [23, 24]:

$$V_{z \text{ ср}} = \frac{\rho g \delta^2}{3\eta}, \quad (6)$$

где  $V_{z \text{ ср}}$  — средняя скорость гидрогелевой пленки, стекающей с вертикальной стенки, м/с.

Объемный расход стекающей по вертикальной стенке гидрогелевой пленки  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) можно определить из выражения [23, 24]:

$$Q = V_{z \text{ ср}} b \delta, \quad (7)$$

где  $b$  — ширина стекающей по вертикальной стенке гидрогелевой пленки, м.

Толщину стекающей с вертикальной стенки гидрогелевой пленки можно определить из выражения (5) с учетом (7) [23, 24]:

$$\delta = \left( \frac{3Q\eta}{b\rho g} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Расход гидрогеля, подаваемого на вертикальную стенку через отверстие пожарного ствола диаметром  $d_{\text{отв}}$  (м) можно рассчитать из выражения [23, 24]:

$$Q = \mu (0,25\pi d_{\text{отв}}^2) \left( \frac{2p}{\rho} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

где  $p$  — давление подачи гидрогеля, Па;

$\mu$  — коэффициент расхода.

Примем допущение, что объемный расход стекающей по вертикальной стенке гидрогелевой пленки равен расходу гидрогеля, подаваемого на вертикальную стенку через отверстие диаметром  $d_{\text{отв}}$ .

Тогда по выражению (8) с учетом (9) можно рассчитать толщину стекающей с вертикальной стенки гидрогелевой пленки:

$$\delta = \left( \frac{3\eta\mu (0,25\pi d_{\text{отв}}^2) (2p)^{0,5}}{b\rho^{1,5}g} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

При количественной оценке эффективности использования гидрогеля примем за базовое значение толщину стекающей водяной пленки  $\delta_b$  (м) и объемный расход воды  $Q_b$  (м<sup>3</sup>/с). Сравним с базовыми значениями для воды объемный расход гидрогеля и толщину гидрогелевой пленки в одинаковых условиях. Чем меньше объемный расход гидрогеля  $Q$  по отношению к объемному расходу воды  $Q_b$  и чем больше толщина гидрогелевой пленки  $\delta$  по отношению к толщине водяной пленки  $\delta_b$ , тем выше эффективность использования гидрогеля.

Для количественной оценки эффективности использования гидрогеля предложен коэффициент  $K_{\text{эф}}$ :

$$K_{\text{эф}} = \frac{Q_b}{Q} \frac{\delta}{\delta_b}. \quad (11)$$

**Таблица 2.** Эффективность использования воды и гидрогелей / **Table 2.** Water and hydrogel efficiency

Параметр Parameter	Вода Water	Гидрогель с добавкой “Фаерсорб” Hydrogel with additive “Firesorb”		Гидрогель с бентонитом $c_d = 5\%$ Hydrogel with bentonite $c_{add} = 5\%$
		$c_n = 1\%$ $c_p = 1\%$	$c_n = 2\%$ $c_p = 2\%$	
Толщина пленки $\delta$ , мм / Film thickness $\delta$ , mm	0,135	1,330	5,355	2,926
Скорость течения $V_{z\text{cp}}$ , м/с / Flow rate $V_{z\text{av}}$ , m/sec	5,97	5,79	1,44	2,75
Объемный расход жидкости в стекающей пленке $Q$ , м <sup>3</sup> /с Volumetric flow rate of liquid in the flowing film $Q$ , m <sup>3</sup> /sec	$8,07 \cdot 10^{-3}$	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$8,03 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент эффективности использования гидрогеля $K_{\text{эф}}$ The efficiency of hydrogel $K_{\text{ef}}$	1,00	1,03	4,16	2,18

Коэффициент эффективности использования гидрогеля  $K_{\text{эф}}$  одновременно характеризует его экономичность по расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине.

Для оценки эффективности использования гидрогеля по его расходу и по толщине гидрогелевых пленок используются следующие выражения: для определения толщины пленки — (10); для определения средней скорости течения и объемного расхода на вертикальной стенке — (6) и (7); для расчета коэффициента эффективности использования гидрогеля — (11). При расчете примем, что подачу воды или гидрогеля осуществляют из пожарного ручного ствола РС-70, имеющего следующие характеристики: давление подачи жидкости  $p = 0,5$  МПа; диаметр отверстия подачи жидкости  $d_{\text{отв}} = 0,019$  м; коэффициент расхода  $\mu = 0,9$ . Примем допущение, что на вертикальной стенке формируется пленка жидкости шириной  $b = 1$  м.

Количественно оценим эффективность использования гидрогелей с концентрацией полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_n = 1\%$  и  $c_n = 2\%$ , а также с концентрацией бентонита  $c_d = 5\%$  (табл. 2).

Анализ результатов расчета (см. табл. 2) показал, что с ростом концентрации гелеобразующей добавки  $c_n$  скорость стекания гидрогелевой пленки по вертикальной стенке значительно уменьшается, при этом существенно возрастает ее толщина, поэтому объемный расход гидрогеля остается примерно одинаковым. Коэффициент  $K_{\text{эф}}$  увеличивается при росте толщины гидрогелевой пленки и при снижении скорости ее стекания с вертикальной стенки. Расчеты показали, что эффективность использования вязких гидрогелей по сравнению с водой в несколько раз больше: для гидрогелей  $K_{\text{эф}} = 2,0 \dots 4,2$ , а для воды  $K_{\text{эф}} = 1,0$ . При тушении пожаров класса А эффективность пожаротушения низковязкими гидрогелями и водой примерно одинакова.

## Результаты и их обсуждение

При ликвидации пожаров класса А традиционно используется вода, но ее эффективность как огнетушащей жидкости мала, поскольку на тушение затрачивается большой объем воды, что обусловлено ее низкой вязкостью. Перспективным направлением в повышении эффективности использования воды при тушении горящих твердых веществ является применение гидрогелей, содержащих 95–99 % воды. Гидрогели получают введением в воду гелеобразующих добавок, которые при взаимодействии с ней набухают и формируют структурированную систему с пространственной структурной сеткой, удерживающей воду. Кроме того, образующиеся на горящих поверхностях гидрогелевые пленки имеют большую толщину и надежно защищают их от источника нагрева и доступа кислорода.

Обобщены экспериментальные данные по влиянию концентрации гелеобразующих добавок на свойства гидрогелей. Получена эмпирическая зависимость вязкости гидрогеля от концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”. Анализ зависимости показывает, что с ростом концентрации полимерной добавки вязкость гидрогеля резко возрастает. Получены также эмпирические зависимости массы испарившейся жидкости от времени при 150 °С для воды, гидрогеля с концентрацией полимерной добавки “Фаерсорб”  $c_n = 1\%$  и  $c_n = 3\%$ . Анализ полученных результатов показал, что с увеличением концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”, т. е. с ростом вязкости, масса испарившегося гидрогеля значительно уменьшается. Таким образом, варьируя концентрацией гелеобразующей добавки, можно существенно менять вязкость гидрогеля, придавая ему необходимый комплекс свойств.

Проведена сравнительная оценка эффективности использования гидрогелей и воды по их расходу и по толщине гидрогелевых и водяных пленок. Получена зависимость толщины гидрогелевой пленки на вертикальной стенке от расхода гидрогеля, подава-

емого на эту стенку, с учетом его вязкости и плотности. Предложен коэффициент эффективности использования гидрогеля, характеризующий его экономичность по расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине. Проведена сравнительная оценка эффективности использования различных гидрогелей по расходу и по толщине гидрогелевых пленок при тушении из пожарного ручного ствола РС-70. Установлено, что по сравнению с водой ( $K_{эф} = 1,0$ ) эффективность использования вязких гидрогелей в несколько раз больше ( $K_{эф} = 2,0 \dots 4,2$ ).

Таким образом, применение вязких гидрогелей является эффективным при тушении пожаров класса А и позволяет существенно снизить расход воды.

### Выводы

1. Причиной низкой эффективности воды при тушении пожаров класса А является ее большой расход, обусловленный низкой вязкостью.
2. Повышение эффективности использования воды при тушении пожаров связано с применением

вязких гидрогелей с большим содержанием воды. Толстые гидрогелевые пленки надежно изолируют горящие поверхности от источника нагрева и доступа кислорода.

3. Для формирования вязких гидрогелей используют различные неорганические и органические добавки, адсорбирующие воду. Вязкость гидрогеля изменяется в широких пределах в зависимости от концентрации гелеобразующей добавки.

4. С течением времени при высокой температуре масса испарившегося гидрогеля уменьшается с ростом его вязкости.

5. Для количественной оценки эффективности использования гидрогеля введен коэффициент эффективности, характеризующий его экономичность по расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения в качестве огнетушащей жидкости вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rasbash D. J.* The extinction of fire with plain water: a review // *Fire Safety Science*. — 1986. — Vol. 1. — P. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
2. *Nolan D. P.* Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. — 2<sup>nd</sup> ed. — Elsevier Inc., 2011. — 340 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5.
3. *Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A.* Fire suppression tests using a handheld water mist extinguisher designed for the International space station // 42<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Systems. San Diego, California : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012. — P. 115–118. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
4. *Rodriguez B., Young G.* Development of the International space station fine water mist portable fire extinguisher // 43<sup>rd</sup> International Conference on Environmental Systems. — Vail, CO : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013. — P. 1–13. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
5. *Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T.* On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires // *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. — Orlando, USA : National Fire and Protection Association, 2007. — P. 217–223.
6. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2012. — № 1(21). — С. 64–69.
7. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2012. — № 1. — С. 53–58.
8. *Войтков И. С., Волков Р. С., Высокоморная О. В., Жданова А. О.* Экспериментальное исследование процессов тушения модельных очагов пожара распределенными во времени и пространстве капельными потоками воды // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 56–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65.
9. *Huang Y., Zhang W., Dai X., Zhao Y.* Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties // *Procedia Engineering*. — 2012. — Vol. 45. — P. 649–654. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.217.
10. *Contreras M. D., Sánchez R.* Application of a factorial design to the study of specific parameters of a Carbopol ETD 2020 gel. Part I. Viscoelastic parameters // *International Journal of Pharmaceutics*. — 2002. — Vol. 234, No. 1-2. — P. 139–147. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00953-X.
11. *Hernández M. J., Pellicer J., Delegido J., Dolz M.* Rheological characterization of easy-to-disperse (ETD) Carbopol hydrogels // *Journal of Dispersion Science and Technology*. — 1998. — Vol. 19, No. 1. — P. 31–42. DOI: 10.1080/01932699808913159.

12. Tichý E., Murányi A., Pšenková J. The effects of moist heat sterilization process and the presence of electrolytes on rheological and textural properties of hydrophilic dispersions of polymers-hydrogels // *Advances in Polymer Technology*. — 2015. — Vol. 35, No. 2. — P. 198–207. DOI: 10.1002/adv.21543.
13. Oppong F. K., Rubatat L., Frisken B. J., Bailey A. E., de Bruyn J. R. Microrheology and structure of a yield-stress polymer gel // *Physical Review E*. — 2006. — Vol. 73, No. 4. — P. 401–405. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.041405.
14. Савченко А. В., Островерх О. А., Холодный А. С. Теоретическое обоснование использования гелеобразующих систем для охлаждения стенок резервуаров и цистерн с углеводородами от теплового воздействия пожара // *Проблемы пожарной безопасности* : сб. науч. тр. — 2015. — № 37. — С. 191–195.
15. Андрюшкин А. Ю., Коньшев М. В., Охапкин М. В. Определение параметров вязкопластического течения полимерной композиции в технологической оснастке при формировании покрытия // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. — 2017. — № 11-12(113-114). — С. 76–81.
16. Андрюшкин А. Ю., Михеенков М. Ю., Цой А. А. Теоретические аспекты нанесения полимерных покрытий на нефтеперерабатывающее оборудование // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2017. — № 1. — С. 53–59. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00032.
17. Андрюшкин А. Ю., Михеенков М. Ю., Цой А. А. Оценка вязкости композиций при формировании полимерных покрытий на нефтеперерабатывающем оборудовании // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2017. — № 1(41). — С. 72–79.
18. Андрюшкин А. Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением : монография. — СПб. : БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2012. — 400 с.
19. Копылов Н. П., Москвилев Е. А., Федоткин Д. В., Стрижак П. А. Влияние вязкости огнетушащего раствора на эффективность тушения лесных пожаров с помощью авиации // *Лесотехнический журнал*. — 2016. — Т. 6, № 4(24). — С. 62–67.
20. Лобанов Ф. И. Использование полимерных материалов в пожаротушении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2004. — Т. 13, № 1. — С. 64–68.
21. De Gennes P. G. Wetting: statics and dynamics // *Reviews of Modern Physics*. — 1985. — Vol. 57, No. 3. — P. 827–863. DOI: 10.1103/RevModPhys.57.827.
22. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 66–76. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.
23. Иваняков С. В., Коньгин С. Б., Крючков Д. А. Гидродинамика аппаратов со свободно стекающей пленкой жидкости : уч.-метод. пособие. — Самара : Самарский государственный технический университет, 2007. — 24 с.
24. Кутепов А. М., Полянин А. Д., Запryanов З. Д., Вязьмин А. В., Казенин Д. А. Химическая гидродинамика : справ. пособие. — М. : Квантум, 1996. — 336 с.

## REFERENCES

1. D. J. Rasbash. The extinction of fire with plain water: a review. *Fire Safety Science*, 1986, vol. 1, pp. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
2. D. P. Nolan. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities*. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier, Inc., 2011. 340 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5.
3. T. Carriere, J. R. Butz, S. Naha, A. Brewer, A. Abbud-Madrid. Fire suppression tests using a handheld water mist extinguisher designed for the International space station. In: *42<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Systems*. USA, California, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012, pp. 115–118. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
4. B. Rodriguez, G. Young. Development of the International Space Station fine water mist portable fire extinguisher. In: *43<sup>rd</sup> International Conference on Environmental Systems*. Vail, CO, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013, pp. 1–13. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
5. A. Abbud-Madrid, D. Watson, J. T. McKinnon. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. In: *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. USA, Orlando, National Fire and Protection Association, 2007, pp. 217–223.



6. A. Yu. Andryushkin, M. T. Peleh. Efficiency of the stewing fire by sprayed water. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2012, no. 1(21), pp. 64–69 (in Russian).
7. A. Yu. Andryushkin, M. T. Peleh. Reception of the small drop of water by gas spraying. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Bulletin of Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2012, no. 1, pp. 53–58 (in Russian).
8. I. S. Voytkov, R. S. Volkov, O. V. Vysokomornaya, A. O. Zhdanova. Experimental study of model fire seats extinguishing by the distributed in time and space water droplet flows. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 56–65 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65.
9. Y. Huang, W. Zhang, X. Dai, Y. Zhao. Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 649–654. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.217.
10. M. D. Contreras, R. Sánchez. Application of a factorial design to the study of specific parameters of a Carbopol ETD 2020 gel. Part I. Viscoelastic parameters. *International Journal of Pharmaceutics*, 2002, vol. 234, no. 1-2, pp. 139–147. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00953-X.
11. M. J. Hernández, J. Pellicer, J. Delegido, M. Dolz. Rheological characterization of easy-to-disperse (ETD) Carbopol hydrogels. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1998, vol. 19, no. 1, pp. 31–42. DOI: 10.1080/01932699808913159.
12. E. Tichý, A. Murányi, J. Pšenková. The effects of moist heat sterilization process and the presence of electrolytes on rheological and textural properties of hydrophilic dispersions of polymers-hydrogels. *Advances in Polymer Technology*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 198–207. DOI: 10.1002/adv.21543.
13. F. K. Oppong, L. Rubatat, B. J. Frisken, A. E. Bailey, J. R. de Bruyn. Microrheology and structure of a yield-stress polymer gel. *Physical Review E*, 2006, vol. 73, no. 4, pp. 401–405. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.041405.
14. A. V. Savchenko, O. A. Ostroverh, A. S. Kholodny. Theoretical basis gelling cooling systems tank walls and tanks hydrocarbons against heat fire. In: *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. Collection of Scientific Works, 2015, no. 37, pp. 191–195 (in Russian).
15. A. Yu. Andryushkin, M. V. Konyshev, M. V. Ohapkin. Determination parameter plastic current to polymeric composition in technological rig when shaping the covering. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu / Military Enginery. Issue 16. Counter-terrorism technical devices*, 2017, no. 11-12(113-114), pp. 76–81 (in Russian).
16. A. Yu. Andryushkin, M. Yu. Miheenkoy, A. A. Tsoy. Theoretical aspects of the fixing polymeric covering on equipment for oil. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Bulletin of Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2017, no. 1, pp. 53–59. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00032.
17. A. Yu. Andryushkin, M. Yu. Miheenkoy, A. A. Tsoy. Estimation to viscosity composition when shaping polymeric covering on equipment for oil. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2017, no. 1(41), pp. 72–79 (in Russian).
18. A. Yu. Andryushkin. *Formirovaniye dispersnykh sistem sverkhzvukovym gazodinamicheskim raspyleniyem* [Forming of dispersed systems with supersonic gas-dynamic spray]. Monograph. Saint Petersburg, BGTU “VOENMEKH”, 2012. 400 p. (in Russian).
19. N. P. Kopylov, E. A. Moskvilin, D. V. Fedotkin, P. A. Strizhak. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires efficiency extinguish using aviation. *Lesotekhnicheskij zhurnal / Forestry Engineering Journal*, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 62–67 (in Russian).
20. F. I. Lobanov. Utilization of polymer materials in fire extinguishing process. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 64–68 (in Russian).
21. P. G. de Gennes. Wetting: statics and dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 1985, vol. 57, no. 3, pp. 827–863. DOI: 10.1103/RevModPhys.57.827.
22. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Analysis of a typical relation used for description of dependence of the extinguishing time of flammable liquids and the specific consumption of various extinguishing agents on their flow rate. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 66–76 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.
23. S. V. Ivanyakov, S. B. Konygin, D. A. Kryuchkov. *Gidrodinamika apparatov so svobodno stekayushchey plenкой zhidkosti* [Hydrodynamics equipment with a liquid film moving under the effect of gravity]. Study reference manual. Samara, Samara State Technical University Publ., 2007. 24 p. (in Russian).

24. A. M. Kutepov, A. D. Polyanin, Z. D. Zapryanov, A. V. Vyazmin, D. A. Kazenin. *Khimicheskaya gidrodinamika* [Chemical hydrodynamics]. Reference manual. Moscow, Kvantum Publ., 1996. 336 p. (in Russian).

*Поступила 21.12.2019, после доработки 19.03.2020;  
принята к публикации 02.04.2020*

*Received December 21, 2019; Received in revised form March 19, 2020;  
Accepted April 2, 2020*

#### Информация об авторах

**АНДРЮШКИН Александр Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой “Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники”, Балтийский государственный технический университет “ВОЕНМЕХ” им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 55603904600; ORCID: 0000-0002-7812-069X; e-mail: sascha1a@mail.ru

**АФАНАСЬЕВ Евгений Олегович**, преподаватель кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2790-3763; e-mail: jenya\_a@list.ru

**КАДОЧНИКОВА Елена Николаевна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4577-390X; e-mail: vf10@yandex.ru

#### Information about the authors

**Alexander Yu. ANDRYUSHKIN**, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of the Department of “The Technology of Structural Materials and Production of Rocket and Space Technology”, Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 55603904600; ORCID: 0000-0002-7812-069X; e-mail: sascha1a@mail.ru

**Eugene O. AFANASIEV**, Physics Educator Faculty of “Physics and Technology Basis of Maintaining Fire Safety”, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2790-3763; e-mail: jenya\_a@list.ru

**Elena N. KADOCHNIKOVA**, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department “Fire Safety of Technological Processes and Production”, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4577-390X; e-mail: vf10@yandex.ru